

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
研究領域事後評価用資料

研究領域「プロセスインテグレーションに
よる機能発現ナノシステムの創製」

研究総括: 曾根 純一

2016年3月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	4
(3) 研究総括	4
(4) 採択課題・研究費.....	5
2. 研究領域および研究総括の選定について.....	6
3. 研究総括のねらい.....	7
4. 研究課題の選考について.....	9
5. 領域アドバイザーについて.....	13
6. 研究領域の運営について.....	14
7. 研究を実施した結果と所見.....	16
8. 総合所見	24

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」

① 本戦略目標の具体的な内容

本戦略目標は、ナノテクノロジーを活用したプロセスの高度化と統合化を進めることによって、バイオとエレクトロニクスが融合したナノシステム、ナノ構造による化学反応場を利用したシステム、自律的に機能する分子システムなど、MEMS (NEMS) 等を含む次世代ナノシステムの創製を目指す。

これまで、様々なデバイスやシステムの高速度化・集積化・小型化等は、トップダウンプロセス技術の発展に支えられてきた。それはシリコン CMOS の高集積化がフォトリソグラフィ技術の微細化によりなされてきたことに顕著に表れている。フォトリソグラフィ等の加工精度は 2007 年現在で 45 nm レベルに達しているが、上記の革新的な機能をもつナノシステムの創製には、数 nm レベルまで加工精度を高めることが必要である。また、自己組織化に代表されるボトムアッププロセスでは、1 nm をきる分子サイズレベルでの形成精度も実現可能であるが、現状では分子等を配列させるだけの技術レベルに止まっている。自己組織化の技術を、分子配置、分子構造等を時間的・空間的にダイナミックに制御して自在にナノ構造体を構築することのできるレベルまで高めるとともに、それらナノ構造体を組み合わせることで自律的に機能を創発する自己機能化のレベルまで発展させていくことが必要である。

本戦略では、従来からの技術的蓄積のあるトップダウンプロセスと、今後の発展が大いに期待されるボトムアッププロセスについて、それぞれの高度化を一層推進するとともに、それらプロセス技術の様々な組み合わせを試みることで、上記次世代ナノシステムの創製をはかることを目的とする。

② 政策上の位置付け

本戦略目標は、社会・産業からの要請が強く、「True Nano」領域における革新的材料開発を伴わなければ解決困難な課題と国際競争の優位を確保する課題の解決を目指すもので、以下の戦略重点科学技術に関係する。

- ・イノベーションを生む中核となる革新的材料・プロセス技術の創出
- ・国民の健康と生活の安全・安心を支える革新的ナノテクノロジー・材料技術の創成

③ 当該研究分野における研究振興方策の中での本研究事業の位置づけ、他の関連施策との切り分け、政策効果の違い

本戦略目標と同様に、ナノプロセスに関連するものとして過去に次の三つの戦略目標があるが、いずれもがプロセスの基盤知の蓄積、基本原理・現象の理解、動作理論の解明などを目指しているものである。

- ・異種材料・異種物質状態間の高機能接合界面を実現する革新的ナノ界面技術の創出とその応用
- ・ナノデバイスやナノ材料の高効率製造及びナノスケール科学による製造技術の革新に関する基盤の構築
- ・生命システムの動作原理の解明と活用のための基盤技術の創出

これに対して本戦略目標では、プロセスとしては未だ未成熟なボトムアッププロセスの開発ならびにナノデバイスの構築に不可欠なトップダウンプロセスのより一層の高精細化によって、次世代ナノシステムを創製する研究を対象としており、前者三つとは根本的に異なる。

④ この目標の下、将来実現しうる成果等のイメージ、他の戦略重点科学技術等に比して優先して実施しなければならない理由、緊急性、専門家や産業界のニーズ

本戦略目標の具体的な成果等を挙げれば、以下の様な次世代ナノシステムの創製である。

- ・タンパク質や DNA 等の自己組織化を利用した新たな配線構造を有するシステム
- ・ウイルスをテンプレートとして作製した電極からなる高効率イオン電池
- ・トップダウンプロセスとバイオが融合した医療用ナノシステムの構築
- ・自己機能化した有機系材料による人工筋肉
- ・光機能性分子が自己組織化してなるセルフクリーニングシステム

これらのシステムの創製には、トップダウンプロセスを「True Nano」領域にまで発展させることは当然として、生体物質を模倣し、マイクロな素過程に立ち戻って電荷分離・伝導機構を明らかにし、それらの知見に基づいてプログラムされたナノ構造体が自ら機能を創発すべく構造化することを可能とする革新的なボトムアッププロセスを開発することが必要である。このボトムアッププロセスの確立とトップダウンプロセスとの統合は、製造技術分野における日本の優位性をさらに高めるものであり、今まさに喫緊に取り組むべき領域であると言える。

⑤ 本研究事業実施期間中に達成を目指す研究対象の科学的裏付け

我が国はトップダウンプロセスの代表例のフォトリソグラフィエッチング技術で世界の最先端を走っている。線源に EUV を使うなどして短波長化させることで、加工分解能の向上が可能になるが、EUV 線源については文部科学省のプロジェクトの1つとしての取り組みが始まっている。また、量子相関を有するもつれ合い光子の特異な振る舞いを利用することでも、光の回折限界をはるかに超える加工分解能の実現が可能である。イオンビーム加工では、希ガスをを用いたイオン源の開発によって加工時の損傷を大幅に減少させることが期待される。また球面ならびに色収差補正技術の導入により、加工精度を数 nm レベルまで大幅に向上できると考えられる。この収差補正技術についても、我が国独自のシステムの開発が文部科学省のプロジェクトで進められている。

一方、ボトムアッププロセスの開拓についても日本は優れた要素技術をもっており、特に高分子工学・有機化学は世界の最先端を走っているとされる。本戦略目標に関連するも

のとして以下のものが挙げられる。

- ・デンドリマー等に代表される高分子ナノ空間制御材料や自己構造化ナノチューブ等の研究
 - ・ウイルスを使った金 - 酸化コバルトのハイブリッドワイヤーの室温合成ならびにそれらの二次元制御によって薄く柔軟なリチウムイオン電池を作る研究
 - ・人工物と生体分子に代表される異種材料間をハイブリッド接合する研究
 - ・ナノサイズ粒子を表面張力等の利用により自己構造化させる研究
 - ・ブロックコポリマーのマイクロ相分離によるパターンドメディアの加工プロセスの研究
- これらの研究に、さらに高度化させたトップダウンプロセスを用いることで、より複雑な構造や高い機能を有する次世代デバイスの創製につながる事が期待できる。

⑥ この目標の下での研究実施にあたり、特に研究開発目標を達成するための留意点

本戦略目標は、単なるプロセス研究ではなく、あくまでも次世代ナノシステムの創製を目指す研究を対象とするものであり、この点を明確に意識した領域運営が求められる。また、一層の科学的探求を要する基盤技術に対する集中的な投資や関係機関との有意義な連携協力体制の構築なども必須である。

本戦略目標では、ナノスケールにおける微細加工、原子分子の挙動の観測、精密な生体分子操作といったハード技術の向上やデータ処理・解析、シミュレーションといったソフト技術の発展のみならず、材料工学、分子工学、界面工学、蛋白工学、流体科学といった既存の科学領域の統合に基づく新規な科学領域の創成が必要となる。このため、大学や独法を中心とした研究体制を前提として、企業が参画した体制がより望ましい。

トップダウンからボトムアップまでのプロセス研究の知見を持つとともに、それらを駆使してナノシステムを構築するまでの広く且つ深い領域全体を俯瞰できる総括の強力なイニシアチブのもと、互いのグループ間の連携を密にし、共通インフラも使いながら、グループ内での明確な役割分担、理論と実験の融合、人材の交流等の研究投資を有効に成果につなげるための具体的な仕組みが必要となる。既存の研究拠点との連携をはかるなどの工夫が考えられるので、十分に留意すること。

(参考) 本研究事業実施期間中に達成を目指す政策的な目標

本戦略目標では、バイオとエレクトロニクスが融合したシステム、ナノ構造による化学反応場を利用したシステム、自律的に機能する分子システム等の次世代ナノシステムを創製することを目標としているが、これにはフォトリソグラフィ、イオンビーム加工に代表されるトップダウンプロセスのさらなる高精細化をはかることと、ボトムアッププロセスを単なる自己組織化から自己機能化まで進化させることが不可欠となる。

トップダウンプロセスでは、フォトリソグラフィにおける露光光源の短波長化によって加工精度を数十 nm から 1nm レベルまで高めることが求められる。また、通常ガリウムイオンの照射により行われるイオンビーム加工は加工精度が 50 nm 程度であるが、ガリウムイオンによる衝撃で加工面が変質し特性劣化が起こり、それを補うための後処理工程が必要

になることが多い。加工精度を数 nm レベルまで向上させることに加えて、無損傷での加工が可能なプロセスの開発が必要である。

一方ボトムアッププロセスについては、単なる自己組織化の研究にとどまることなく、ハイスループット・低コスト・省エネルギー生産を可能とする革新的なプロセス技術の開拓によって、最終的には機能の創発するナノシステムの構築に資することを目指す。このためには、多種多様な無機材料ナノ粒子やデンドリマーに代表される様々な構造をもつ有機分子等のナノ構造体を時間的・空間的にダイナミックに制御する技術の確立が不可欠である。また、生体分子の示す自己構造化、自己複製、自己修復等の挙動から得られる定量的な情報の抽出や解析を行い、自己機能化するための設計指針を確立することも重要である。

現在の製造産業においては、トップダウンプロセスによる微細加工が中心であるが、より発展したトップダウンプロセスと実用化レベルまで進化したボトムアッププロセスとを統合することは、国内のナノテク産業が国際的に成功をおさめるのに必須要素であると言っても過言ではない。

(2) 研究領域

「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」(2008 年度発足)

本研究領域は、フォトリソグラフィ等のトップダウンプロセスと自己組織化に代表されるボトムアッププロセスの高度化と統合化を進めることによって、革新的な機能を発現する次世代ナノシステムの創製を目指すものである。

具体的には、トップダウンプロセスによって作られた微細な電子回路、MEMS・NEMS 等のナノ構造デバイスと、ボトムアッププロセスによって生成されたバイオ・有機材料、自己組織化材料等との融合を図ることにより新たな機能を発現させる研究、または機能を有するボトムアップナノ構造体を工学的に応用可能なシステムとして構築する研究を対象とし、従来にない機能、性能をもつセンサ、アクチュエータ、バイオチップ、電子・光デバイス、エネルギーデバイス等の基盤構築を目指す。さらに、これらを集積・最適化した次世代ナノシステムの構築まで念頭に置いて研究を推進する。

(3) 研究総括

曾根 純一 (国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー)

(4) 採択課題・研究費

表1 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	研究終了時の所属・役職	研究課題	研究費	
				当初	実績
2008年度	浦岡行治	奈良先端科学技術大学院大学 教授	生体超分子援用フロンティアプロセスによる高機能化ナノシステム	402	424
	澤田和明	豊橋技術科学大学 教授	イオンイメージセンサ技術を利用した医療生体ナノシステム構築	320	385
	西澤松彦	東北大学 教授	電気化学的な異種材料ナノ集積化技術の開拓とバイオデバイス応用	220	249
	畠 賢治	産業技術総合研究所 首席研究員	自己組織プロセスにより創製された機能性・複合 CNT 素子による柔軟なナノ MEMS デバイス	201	205
	藤岡洋	東京大学 教授	自己組織化グラファイトシート上エレクトロニクスの開発	225	321
	宮原裕二	東京医科歯科大学 教授 所長	機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製	444	451
2009年度	宇理須恒雄	名古屋大学 特任教授	光神経電子集積回路開発と機能解析・応用	225	247
	北森武彦	東京大学 教授	拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成	430	428
	寒川誠二	東北大学 教授	バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現	430	467
	染谷隆夫	東京大学 教授	大面積ナノシステムのインタフェース応用	225	134
	辻井敬亘	京都大学 教授	濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製	225	273
	藤井輝夫	東京大学 教授 生産研究所 所長	マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織 Showcase の構築	400	442
2010年度	齊藤英治	東北大学 教授	スピン流による熱・電気・動力ナノインテグレーションの創出	320	327
	野地博行	東京大学 教授	生体分子1分子デジタル計数デバイスの開発	385	483
	樋口昌芳	物質・材料研究機構 グループリーダー	エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー	215	226
	山元公寿	東京工業大学 教授	新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立	225	291
			総研究費	4,892	5,353

当研究領域における各課題について、研究費の当初予定額及び終了時累積額を上表に示す。研究領域発足にあたり領域研究費の約1割を総括裁量経費として確保し、これまでに領域内の研究チーム間の共同研究に対する支援や、研究を加速する目的で研究費の追加

配賦を行ってきた。また、領域研究費の外枠でも、JST-RA 制度、社会還元策、男女共同参画支援、機器活用プログラム、海外連携促進プログラムなどの制度を利用して予算追加を行った。

総括裁量経費によるチーム間共同研究の支援を 2010 年度に開始し、2014 年度までの 5 年間にわたって年 1 回テーマの募集・選定を行った。領域アドバイザーの協力の下に研究総括が提案テーマの審査・予算査定を行い、共同研究テーマ延べ 26 件を採択、総額 1 億 4 千 2 百万円を配賦した。また、毎年度の研究計画見直しの際、各研究チームに対して予算増額・前倒しの希望を調査し、必要に応じて研究加速等のための予算を総括裁量経費から配賦した。

2009 年度に実施された JST-RA 制度では、博士課程在籍者を対象として CREST 専任 RA を募集し、人件費の追加配賦を行った。また、2009 年度には「社会還元策」として研究成果の社会還元を促進する目的でテーマ募集が行われ、当領域からは澤田チームによる「高画素イオンイメージセンサの試作」に対して予算が追加配賦された。

男女共同参画支援による予算追加は、JST「出産子育て等支援制度」の下に実施されたもので、2011 年から 2015 年度まで研究員の出産・育児に伴う負担軽減のための予算を追加配賦した。2011 年度には、東日本大震災からの復旧を支援するため、各研究チーム・研究グループに対して震災による被害状況を調査し、追加予算配賦した。その際、必要性・緊急性の高いものについては、総括裁量経費により迅速に措置した。

2013 年度には、先端計測分析技術・機器開発プログラムで開発された機器の活用を目的に実施された機器活用プログラムにおいて、野地チーム、山元チーム、藤井チームの提案が採択され、それぞれに予算が追加配賦された。海外連携促進プログラムでは、2013 年度は藤井チーム、2014 年度は樋口チーム、北森チームの提案が採択され、予算が追加配賦された。

さらに、成果の最大化を目的に 2014 年度より開始された終了チームへの 1 年間の事後支援プログラムにおいて、2014 年度に澤田チームと藤岡チーム、2015 年度に寒川チームが採択され、それぞれに 2000 万円程度の予算が追加配賦された。

なお、2009 年度採択の染谷チームは 2011 年度に ERATO に採択されたため、予算執行額が少ない。

2. 研究領域および研究総括の選定について（JST 記載）

本研究領域は、従来からの技術的蓄積のあるトップダウンプロセスと、今後の発展が大いに期待されるボトムアッププロセスについて、それぞれの高度化を一層推進するとともに、それらプロセス技術の様々な組み合わせを試みることで、次世代ナノシステムの創製を目指す研究を対象としている。本戦略目標では、以下の 3 つの研究領域が選定されており、研究領域 1 が本研究領域である。

研究領域 1 においては、トップダウンプロセスとボトムアッププロセスとの融合によ

り、革新的な機能を発現する次世代ナノシステムの構築を目指すことに重点を置いた研究を、異分野融合を強く意識した CREST によって推進される。

研究領域 2 においては、次世代ナノシステムの創製を強く意識しつつ、制御性と拡張性に課題を抱えるボトムアッププロセスに、生体模倣などの新たな手法を取り込むことにより、システムのキー要素となる自立した機能材料を創出する研究を、異分野の研究者が高度な協同作業で実施する CREST によって推進される。

研究領域 3 においては、個人の独創的な発想を活かし、次世代ナノシステムの創製に向けた高次機能を創発するモノづくりを目指したさきがけによって推進される。

以上の通り、CREST においては 2 つの異なるアプローチによりそれぞれの特質を生かした研究領域で構成されていると共に、これら研究領域が有機的な相乗効果をもって運営されることが期待される。あわせて、広範な分野の中から次世代ナノシステムへのトリガーとなるべき機能創発を目指す独創的研究を取り上げるさきがけが選定されている。これら 3 研究領域が総合的かつ相補的に対象分野を満たすように考慮されており、より複雑な構造や高い機能を有する次世代デバイス・システムの創製を目指す戦略目標の達成に向けて適切に選定されている。また、上記の通り様々なアプローチ、分野からの革新的提案が期待されており、いずれの研究領域においても幅広い分野から多様な研究についての優れた研究提案が、多数見込まれる。

曾根純一は、NEC 中央研究所、基礎研究所において情報技術を中心とした基礎研究に携わり、半導体デバイスのみならず超伝導デバイス、量子デバイスなど次世代デバイスの研究開発に第一線の研究者として貢献してきた。近年では、NEC 基礎研究所所長、基礎・環境研究所所長、中央研究所支配人を務め、基礎から応用まで研究開発全体の指揮を取ってきている。特に、パソコン筐体向けのバイオプラスチックや、自動車向けリチウムイオン電池など既に製品化までこぎつけた研究開発プロジェクトを統括するなど、幅広い技術分野で活躍してきた。このような背景から、同氏は本研究領域について先見性・洞察力を有し、また適切なマネジメントを行う経験・能力を有していると見られる。

また、国際固体素子・材料コンファレンス (SSDM) 論文委員長、ナノ学会副会長などナノテクノロジー分野と関連の深い学会において要職を歴任、さらに東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構客員教授および京都大学工学系研究科特命教授を兼務するなど関連するアカデミアへの貢献も大きい。

以上を総合すると、関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行いうることが期待される。また、研究領域全体を俯瞰し強力なイニシアチブを発揮することが求められる CREST の研究総括として適任と思われる。

3. 研究総括のねらい

ナノ構造体の形成、物性解明、さらには機能発現に関する研究は、着実な進展を見せており、工学的な応用を図ろうとする気運が高まっている。これらの機能は情報通信分野、

環境・エネルギー分野、ライフサイエンス分野における機器やデバイスに大きなイノベーションをもたらす可能性を秘めている。しかしながら、ナノ構造体の工学的・産業的応用は大きな期待を受けながら、十分にその高いポテンシャルを具体的に提示できているとは言い難い。本研究領域では、これまで個々に技術蓄積がなされてきたナノプロセスを統合化し、新たな機能を有するナノシステムを創製することを目的としている。本研究領域のテーマ設定、遂行にあたっては、トップダウンプロセスとボトムアッププロセスのインテグレーション、ならびに異分野融合が、重要なキーワードであると考えている。以下にその理由を述べる。

これまで半導体の微細化によるデバイスの性能向上が電子機器の驚異的な発展を支えてきた。しかしながらトップダウンプロセスによる微細化が数十 nm の領域に入り、その技術的、経済的限界が顕在化しつつあり、より微細な領域へは、自律的な化学反応を利用したナノ構造体の自己組織的な形成、即ち、ボトムアッププロセスが何らかの形で必要と考える。ボトムアッププロセスとトップダウンプロセスを組み合わせることで、原子・分子レベルまでのナノ構造体形成が可能になるだけでなく、低コスト生産が可能になり、広範な分野におけるナノシステムの展開が可能になると期待される。

快適・利便で安全、安心な将来社会を実現するためには高度に発達した情報通信技術の活用が必要なことは言うまでもない。将来の高度情報社会においては、我々の身の回りに様々なセンサーが配置され、センサーからの情報は通信網にアップロードされ、通信網に接続された高性能サーバー群によって集積された多量のデータの分析、加工、知識化がなされる。これらのサーバー群からは、個人に必要な情報が必要な時に、多様な情報端末を通して提供される。そこでは高速に情報処理を実行し、情報を伝える電子デバイスや光デバイスだけでなく、人間の五感に対応する多様なセンサー、個人々の健康状態を、リアルタイムに、分子レベルでモニターするバイオチップ、上記のセンサーや情報端末にエネルギーを供給する高性能電池等々、多様なデバイスが必要になる。これらのデバイスは小型化、ウェアラブル化、タグ化された形で我々の身の回りに配備されるであろう。このような機能を実現するためには異分野間の技術融合が必要であり、それによって初めて集積化されたナノシステムへの展望が見えてくると考える。

上記では、次世代ナノシステムに関するひとつの考えを提示したが、これに留まるものではなく、ナノシステムが提供する新しい機能は環境・エネルギー分野、医療・健康分野でも大きなイノベーションにつながる可能性を秘めている。とりわけヒトゲノムの解読、iPS 細胞の創出に見られるように近年のライフサイエンスの進展は著しく、100年前の量子力学勃興期を彷彿させる発展期にある。量子力学をベースに現在のテクノロジーが開花したことを考えると、DNA や細胞などの生体物質を半導体チップ上に搭載し、ライフサイエンスの膨大な知の集積と融合から生まれるイノベーションへの期待は大きい。また、究極のボトムアッププロセスで形成される生体物質を、トップダウンプロセスで形成される人工的なナノ構造体上に持ちこみ、未知の生命体の機能解明や診断、医療、創薬への活用を生

み出すことは、本研究領域の重要な挑戦課題である。本研究領域ではこれらの研究課題の実行を通して、次世代ナノシステムの多様な可能性を探索し、そのイメージを固めると共に具現化していきたい。

なお、本研究領域は「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」といった大きな戦略目標を、CREST「プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出」入江研究総括と協同で担う。入江領域ではナノ構造体の創出に力点が置かれるのに対し、当領域では明確な出口を意識したナノシステムの創出がミッションとなる。そのため、領域の運営にあたっては、研究成果により新しい学問分野を切り拓くことだけでなく、常に工学的応用と新しい市場の創出を意識して進めていく。これにより、日本がこの分野で世界をリードし、世界へ次世代ナノシステムとしての骨太なメッセージを発信していきたいと考えている。

4. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針

上記した研究総括のねらいを踏まえ、具体的な採択判断ポイントは、1) ナノ構造体がもたらす特異な機能を積極的にナノシステムへ活用しようとしているか、2) 新しい学問分野、新しい市場を切り拓くようなイノベーションの可能性を秘めているか、3) 上記の可能性につながるような独創的なアイデア、それを具現化する技術、そのエビデンスデータが示されているかとする。

本研究領域では研究課題の実行を通して、次世代ナノシステムの多様な可能性を探索し、そのイメージを固めると共に具現化していきたい。また、研究課題間の共同作業を積極的に奨励し、次世代ナノシステムとしての骨太なメッセージを世に発信していきたいと考えている。なお、工学的応用を図る意味では、産学連携による提案も歓迎する。また、これまで CREST 等のナノテク関連プロジェクトで要素技術の開発がなされ、次のステップとして新たな機能を有するナノシステムとして工学的応用を目指す研究の提案も歓迎する。テーマ選択に当たっては、提案内容の独創性が最重要ポイントであることは論を待たないが、ナノシステムとしての発展性、技術の波及効果としての広がり、産業的インパクトの大きさも十分に考慮したい。

研究領域として以上に述べてきた目的を達成するためには、それにふさわしい提案を採択するだけでなく、採択後 3 年目に実行する中間評価も重要である。課題の目標達成が難しいと判断される場合は、大幅な内容の見直し、場合によっては中止もありえると想定される。日本がこの分野で世界をリードし、世界へ情報発信していくために、多くの人の積極的な提案を期待したい。

(2) 2009 年度、2010 年度募集における付加要項

前年度までの応募状況を見たうえで、公募時に強調したい点を募集・選考の方針として付け加えて発信した。2009 年度は、ナノシステムの環境・エネルギー分野への挑戦に関する応募を、2010 年度はナノシステムによる環境・エネルギー分野への挑戦、エレクトロニクス分野における省エネルギー化への挑戦をそれぞれ奨励した。これは毎回、バイオ系の提案が多く、領域の目標としては、手厚く選考できたものの、ナノテクノロジーの応用として重要になりつつ環境・エネルギー分野、省エネルギーエレクトロニクス分野が手薄になっていると判断したからである。なお、2010 年度は最終募集となる事から、若手の勇氣ある提案を奨励した。

(3) 選考結果

① 2008 年度選考結果

本研究領域の戦略目標は、自己組織化に代表されるボトムアッププロセスと半導体技術に代表されるトップダウンプロセスを組み合わせ、革新的な機能を有するナノシステムを創製することにある。提案に当たっては材料に関する科学的知識、プロセスに関する融合的な基盤技術が必要なだけでなく、ナノシステムとしての応用展開をしっかりと見据える必要があり、提案は容易ではないと想像する。そのような中で、ナノシステムとしてのイノベーションを引起そうとする挑戦的、意欲的な提案が 32 件集まった。提案をあえて分野別に分類すると、バイオ応用 6 件、MM(N)EMS 応用 5 件、エレクトロニクス応用 4 件、エレクトロニクス/バイオ融合 7 件、物理/化学/バイオ融合 7 件、エレクトロニクス/エネルギー融合 3 件となる。ここでいうエレクトロニクスにはフォトニクスも含まれている。これらの提案に対し、上記分野をカバーできる 10 名の領域アドバイザーと共に、書類選考、面接選考を行い、エレクトロニクス/バイオ融合領域で 3 件、エレクトロニクス/エネルギー融合領域で 1 件、化学/バイオ融合領域で 1 件、M(N)EMS/エレクトロニクス応用で 1 件の計 6 件を採択した。全体的にボトムアッププロセスとしてバイオに関連した技術の提案が多かったように思う。結果として、バイオ技術を半導体に代表されるトップダウンプロセスと組み合わせ、ナノシステムとして将来への大きな発展性を示した提案が今年度は多く採択されることになった。これだけの難しい研究課題に挑戦してくる提案だけに、皆粒ぞろいで、光る部分を持っている。アドバイザーの意見も分かれたが、最終的には、1) ボトムアップとトップダウンの融合プロセスに挑戦しているか、2) 大きなイノベーションにつながる可能性を秘めているか、3) 上記の可能性につながる独創的なアイデア、それを具現化できる保有技術、エビデンスデータはあるか、で判断した。

バイオと物理・化学分野との融合、バイオ技術とエレクトロニクス、エネルギー技術との融合は今後の大きな技術の流れであり、引き続き、同領域の有望な提案は採択していきたい。同時に、自律的な化学反応により形成される広い意味での自己組織化ナノ構造、そ

れを利用して実現されるエレクトロニクス・フォトンクス応用、環境・エネルギー応用も安全・安心で持続可能な将来社会を実現する上でますます重要な技術になってくることは間違いない。次回以降、そのような提案も多いに期待したい。

②2009 年度選考結果

本研究領域の戦略目標は、自己組織化に代表されるボトムアッププロセスと半導体技術に代表されるトップダウンプロセスを組み合わせ、革新的な機能を有するナノシステムを創製することにある。提案に当たっては材料に関する科学的知識、プロセスに関する融合的な基盤技術が必要なだけでなく、ナノシステムとしての応用展開をしっかりと見据える必要があり、提案は容易ではないと想像する。2 回目の募集となる今回は、ナノシステムとしてのイノベーションを引き起こそうとする挑戦的、意欲的な提案が 48 件集まった。応募件数も前回に比べ、1.5 倍に増加、粒よりで激戦となった。提案は、分子・DNA 操作、バイオ・ニューロチップ、マイクロ流路・MEMS、CNT・グラフェン応用、スピントロニクス応用、エレクトロニクス・フォトンクス応用、エネルギー・環境応用など、非常に多岐の分野にわたっている。これらの提案に対し、上記分野をカバーできる 11 名の領域アドバイザーと共に、書類選考、面接選考を行い、神経細胞チップ、マイクロ流路のバイオ応用、マイクロ流路のエネルギー応用、分子技術のエネルギー応用、有機分子技術のエレクトロニクス応用、バイオ技術のエレクトロニクス・エネルギー応用の計 6 件を採択した。本研究領域では、ナノシステムとして新しい融合分野の開拓を目指しており、必然的にカバーする分野も多岐にわたってくる。アドバイザーの意見も分かれ、多いに議論を戦わせたが、最終的には、1) ボトムアップとトップダウンの融合プロセスに挑戦しているか、2) 新しい技術分野、学問分野を拓く可能性、あるいは社会に大きな影響を与える産業応用につながる可能性を秘めているか、3) 上記の可能性につながる独創的なアイデア、それを具現化できる保有技術、エビデンスデータはあるか、を評価基準として判断した。今回の公募に当たっては、エネルギー・環境分野への挑戦を歓迎するとのメッセージを事前に発したが、結果的にそれが反映されたような形となった。

今、ナノテクノロジーは、エネルギー・環境問題といった地球的な課題の解決に、また健康・安全・安心といった生活の質の向上に向かって、決定的に重要な技術になりつつある。そのためには日本が先行して築き上げてきたナノテクノロジーをベースに分野融合的な発想を喚起し、ナノシステムとして社会の喫緊のニーズに答えていく必要がある。1 回目と 2 回目の採択プロセスでは、上記評価基準の 1) をかなり厳密に適用してきたが、最終となる次回はナノシステムに対するこれらの期待を勘案し、1) の基準はこれまでに比べて広く解釈し、2)、3) を重要視していこうと考えた。

③2010 年度選考結果

本研究領域の戦略目標は、プロセスインテグレーションにより革新的な機能を有するナ

ノシステムを創製することにある。提案に当たっては材料に関する科学的知識、プロセスに関する融合的な基盤技術が必要なだけでなく、ナノシステムとしての応用展開をしっかり見据える必要があり、提案は容易ではないと想像する。本研究領域の最終募集となる今回は、ナノシステムとしてのイノベーションを引き起こそうとする挑戦的、意欲的な提案が64件も集まった。これまで3回の募集を行ったが、提案数は、32件、48件、64件と、大幅に増えてきており、この研究領域の盛り上がりを感じた。今回は最終年度ということもあり、予算の関係から採択件数を4件と絞らざるを得ず、競争率16倍の激戦となった。そのため、優れた提案でありながら採択できなかった案件も多く、まさに後ろ髪を引かれる思いの選考となった。提案は、原子・分子・DNA操作、バイオ・医療応用、マイクロ流路・MEMS、CNT・グラフェン応用、スピントロニクス応用、エレクトロニクス・フォトンクス応用、エネルギー・環境応用など、非常に多岐の分野にわたっている。今回の募集では若手からの意欲的な提案を期待する旨のメッセージを事前に発信したが、それを反映して若手からの提案が多かったのも特徴である。これらの提案に対し、上記分野をカバーできる11名の領域アドバイザーと共に、書類選考、面接選考を行い、触媒応用などを目指した原子の精密操作、医療応用を目指した生体分子の超高感度計測、スピンの新たな制御法による新物理開拓、新たな金属・有機ハイブリッドポリマーによるディスプレイ・エネルギー応用の計4件を採択した。いずれも独創性の高い挑戦的な提案ばかりである。本研究領域では、ナノシステムとして新しい融合分野の開拓を目指しており、必然的にカバーする分野も広く、選考は容易ではないが、最終的には、1) 新しい技術分野、学問分野を拓く可能性、あるいは社会に大きな影響を与える産業応用につながる可能性を秘めているか、2) 上記の可能性につながる独創的なアイデア、それを具現化できる保有技術、エビデンスデータはあるか、を評価基準とした。

今年度、新政権による日本の新成長戦略が発表された。日本が世界に伍し、世界を先導していくために、グリーンイノベーションとライフイノベーションにより、社会の喫緊のニーズに応え、科学技術立国を目指そうとするものである。ナノテクノロジーは物質科学をベースにして分野融合的な発想でこれら両イノベーションの牽引役となることが期待されている。当研究領域におけるこれまで3回の採択課題を、今、改めて見直してみると、まさにこれら両イノベーションの創出に真正面から取り組んでいるものばかりである。採択が完了した今後は、採択テーマ間連携、グローバル展開、死の谷を越える産業化等を通じて研究の加速を図り、上記の社会からの期待に少しでも応えていきたい。

5. 領域アドバイザーについて

表2 領域アドバイザー一覧

領域アドバイザー名	終了時の所属	役職	任期
大橋啓之	日本電気株式会社 グリーンプラットホーム研究所	主席研究員	2009年4月～ 2016年3月
小野崇人	東北大学大学院工学研究科	教授	2008年4月～ 2016年3月
栗原和枝	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構	教授	2008年4月～ 2016年3月
清水敏美	産業技術総合研究所	ナノテクノロジー・材料・製造分野副研究統括/ナノチューブ応用研究センター副センター長（兼務）	2008年4月～ 2016年3月
出川 通	株式会社テクノ・インテグレーション	代表取締役社長	2008年4月～ 2016年3月
鳥光慶一	NTT 物性科学基礎研究所(現、東北大学 大学院工学研究科)	主席研究員 (現 教授)	2008年4月～ 2016年3月
西本清一	(財)京都高度技術研究所/京都市産業技術研究所	理事長/ 所長	2008年4月～ 2016年3月
馬場嘉信	名古屋大学大学院工学研究科	教授	2008年4月～ 2016年3月
板東義雄	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点	NIMS フェロー/ MANA 最高運営責任者	2008年4月～ 2016年3月
冬木 隆	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科	教授	2008年4月～ 2015年2月
松本和彦	大阪大学産業科学研究所	教授	2008年4月～ 2016年3月

領域アドバイザーの一覧を表2に示す。研究総括の専門が物理学と電子工学であり、関連する分野の研究はほぼカバーできるとの考えから、その分野については、少数の信頼のできるアドバイザー（松本、冬木）を配するに留めた。研究領域の設定から、バイオ関連、化学関連の研究テーマの応募が多いと予想されたため、その分野の研究アドバイザーを手厚く選んだ。鳥光、西本、馬場の各氏がバイオ関連に、また栗原、清水、坂東の各氏が化学関連を相当した。MEMS 関連の応募も想定されたため、小野氏の他研究領域が開始するときに実施されていたNEDOのMEMSプロジェクト「BEANS」の評価委員、出川氏もに加わって頂いた。初年度の公募でスピントロニクス関連の応募が散見されたため、その分野に詳しい大橋氏に次年度（2009年度）から加わって頂いた。産業界との連携については、研究総括が企業の研究所で基礎研究の推進に長く携わっており対応できると考え、特に産業界の有識者を参加させることはしなかった。各専門領域での学術的リーダを領域アドバイザーとして選定したが、結果的には企業から3名加わることになった。全体的には上記の体制で思惑通りの運営ができている。

6. 研究領域の運営について

本研究領域では、ボトムアップとトップダウンのプロセス融合によって新しいナノ構造体を創製し、そこで発現する機能を活用し、ナノシステムとしての新たな工学的応用を目指す研究を推進した。そのために必要な学問領域は物理、化学、生命科学、電子工学、分子工学、機械工学、細胞工学等、多岐にわたる。これらの研究課題から学術的に高い成果を生み出すためには、多様な専門分野をカバーする領域アドバイザーの積極的な協力が必要となる。また、具体的なイメージが不明確なナノシステムを追究するには、分野融合が必須であり、領域内での共同研究を積極的に推進する必要がある。工学的応用を図るには産業界との連携が必要であり、出口を意識した研究の推進と産業界との連携を図る必要がある。以上の課題を達成するために、以下の運営を実施した。

(1) 多様な専門領域からなる研究課題の指導・助言

指導・助言については、以下の方針を進めた。

- ・物理と電子工学を専門とする研究総括をサポートするため、化学、生命科学、細胞工学の分野で活躍する専門家をアドバイザーとして手厚く配置した。
- ・研究代表者毎に、専門領域が合致するアドバイザーを2名ずつ配置、その研究課題に関し、責任を持って研究総括を支援する体制とした。その一環として、対応する研究課題へのサイトビジット（下記記載）には原則同行してもらう。
- ・領域会議：年1回、全ての研究課題に対し、進捗を発表する領域会議を開催、アドバイザーと共に助言を行ってきた。なお、2011年度から、中間評価が終わった課題については公開シンポジウムの形で実施した。
- ・サイトビジット：研究代表者の研究実施場所を領域アドバイザーと共に訪問し、研究内容につき密な議論を実施、研究の方向性につき指導・助言を行っている。実施は採択直後と3年目（中間評価前）、5年目（事後評価前）を基本とする。それ以外に進捗が懸念された課題については、その都度、別途訪問し議論を実施した。

上記方針で実施した指導・助言の実績を以下にまとめる。

- ・なお、浦岡研究代表者による課題については、一部テーマにつき見直しを実施、研究計画の変更を行った。藤井研究代表者の課題については、生命科学的な意義について再確認、医療・創薬応用に向け研究を加速する事を決めた。澤田研究代表者については成果のバイオ応用が課題であったが、多くのバイオ専門家との共同研究が実施されるに至る。宇理須研究代表者については期中で、脳疾患医療に向けた研究に注力する方向で研究の重点化シフトを行ったため、最終目標を含め計画変更の議論を精力的に行った。樋口研究代表者については得られた成果をもとに電子ペーパー試作品を作製、動作実証を目指すと共にナノテク展示会でデモを行う方向で議論を重ねた。
- ・野地研究代表者の課題については、研究者自身の持つ特許に外国企業が注目して研究

者との直接交渉を進めていることに懸念を抱き、研究領域担当の協力の下に知財センターの専門家に橋渡しした。これによって権利を十分に確保する形での交渉がまとまっただけで無く、その後の共同研究ならびに先端計測プログラムでの共同提案等につながり、さらには ImPACT の採択にもつながった。

- ・また、研究成果を基にイノベーションの創出に特に成果が期待されるテーマについては、研究期間を1年間延長して成果の充実化や共同研究企業を紹介するなどして ACCEL へのつなぎを図った。
- ・その他、各研究代表者の主催する会議には、日程の許す限り参加している。

(2) 領域内共同研究の推進

領域内の研究代表者間の共同研究を奨励するために、毎年、共同研究テーマを募集した。選定されたテーマについては総括裁量経費を配賦して共同研究を推進させた。領域内の共同研究により、個々の研究課題に対する補完技術が導入され、その進展が期待できるだけでなく、ナノシステム創製という共通目標が、より具体的な姿にブレークダウンされることを期待している。共同研究の内容については補足資料4にまとめられている。代表的成果として、(1) CNT バイオ電池の開発、(2) エレクトロアクティブマイクロチェンバアレイを用いた細胞及び生体分子の解析、(3) 濃厚ポリマーブラシによる2次元イオン画像チップの高性能化、(4) 中性粒子ビーム窒化による低温 GaN 薄膜形成などを挙げることができる。これらの成果の詳細、は本評価資料の7. 研究を実施した結果と所見の章の最後に記載しておく。

(3) 領域間連携の推進

- ・同じ戦略目標下の3領域（CREST「ナノ構造体」、「ナノシステム創製」、さきがけ「ナノシステム」）での連携を図るため、各々の領域会議に研究総括、技術参事、領域担当が相互に参加した。
- ・上記3領域の合同会議を提案、第1回目として2012年10月に実施した。有意義な交流が図れたため、2013年、2014年、2015年と毎年一度、3領域から主要成果につき研究者が口頭発表、また全ての課題に対しポスター発表を行う合同会議を実施した。

(4) 産業界との連携奨励

- ・工学的応用としての出口を意識した研究を目指す。当初、研究領域全体でも少数に限られていた産業界との共同研究が63件と飛躍的に増大した。その中には研究総括、アドバイザーが直接、仲介を取り、共同研究につながったケースもあった。
- ・企業コンソーシアムとして先端半導体の研究を行っている LEAP（超低電圧デバイス技術研究組合）と浦岡研究代表者との意見交換会を実施した。

(5) その他

- ・ バイオ系の課題については、全体で 16 件中の 7 件と多く、内容については細胞のハンドリング、バイオ計測、脳神経に大別できるが、共通の課題、他研究チームに展開可能な技術、研究チーム間で補完できる技術も多いため、7 件の課題の研究代表者および共同研究者が集まる領域内ワークショップを開催し問題意識を共有したうえで、集中的な議論を行った。この試みにより、互いに研究状況を理解しあう事が可能となり、その後、いくつかの共同研究に発展している。
- ・ 2008 年度に 2 件を Feasibility Study として選択、1 年間をかけ、その課題の将来性、妥当性を提案者と議論し、うち 1 件を次年度の課題選考会議にかけ、採択した。

(6) 研究費の配分

- ・ 領域運営のため総括裁量経費を研究費の約一割を確保している。
- ・ 総括裁量経費は主に「チーム間共同研究」、「特定テーマの研究加速」、「震災復旧」、「その他、突発的事項」に対して配賦する。
- ・ 領域外枠からも各種制度を利用して予算配賦（詳細は 1. (4) の追加配賦に関するコメントに記載）した。

7. 研究を実施した結果と所見

ナノテクノロジーはナノスケール（通常は原子、分子レベルから 100 ナノメートル以下のスケールを意味する）の構造体で発現する特異な物性や機能を制御し、その工学応用を図る技術と理解される。ナノテクノロジーは、人々の生活に直結する情報通信・エレクトロニクス、健康・医療、環境・エネルギー、社会インフラといった広範な技術分野を横串として下支えし、各々の分野にイノベーションを引き起こすエンジンとして期待される。従って、ナノテクノロジーが社会的、産業的価値を創出するには、先鋭化した個々のナノテクノロジーが、他の分野の技術を取り込み、融合し、システムとして機能することが求められる。本研究領域ではそのようなナノシステムを実現することを目指している。ナノシステムという言葉を用いたのは本研究領域が最初と理解しており、その具体的な姿が最初から明確にあるわけではない。ナノシステムに関する上記のおおまかなイメージのもと、本研究領域の活動は、ナノシステムの具体的な姿を研究代表者達と共に創り上げていくプロセスそのものであると理解している。2008 年度に本研究領域が設定された後、社会からの科学技術への期待として、“環境・エネルギー・資源問題解決に向けたグリーン・イノベーション”、“高齢化が進む日本の健康・医療問題解決に向けたライフ・イノベーション”、“スマート社会実現に向けた情報通信用エレクトロニクスの進展”が、各々求められている。以下ではこれらの要請に対して本研究課題がどのように関与しようとしているか、(1) スマートでエコロジカルな社会実現へデバイス・材料革新、(2) 健康・医療問題解決へライフイノベーション、(3) 独自の手法によるナノ構造体の創出と新応用分野の開拓に分け、

各々研究のねらい、本 CREST 期間で達成された研究成果、今後の展開につき以下に記す。最後に、ナノシステムという概念を明確にするうえで、大きな役割を果たした研究領域内の研究課題間で実施された共同研究、さらには本 CREST の成果を発展させる継続の国家プロジェクトの獲得状況につき、述べておく。

(1) スマートでエコロジカルな社会実現に向けたデバイス・材料革新

① 自己組織化生体材料のエレクトロニクス・フォトニクス応用

生体超分子の持つ特異的な機能を積極的に活用することで、半導体プロセスに代表されるトップダウンプロセスでは実現不可能な微小なナノ構造体の集合体を形成し、高機能ナノシステムの実現が可能になると期待される。ここでは無機材料を内包し、外部をペプチドで修飾されたフェリチン分子が有するサイズ均一性、自己組織化機能、特異的無機材料認識機能を利用し、ナノメートルオーダーの微小ドットのアレイ構造を有する新規な半導体デバイスを開発した。得られた平面上のドット密度は 10^{12} 個/ cm^2 を超えており、デバイスに供し得るドット密度としては世界トップであろう。浦岡研究代表者は多層化された Co ナノドットをゲート絶縁膜に挿入し、メモリ動作領域が広く、多値動作可能な不揮発メモリを実現した。また究極の微小メモリとして酸化鉄ナノドットの規則的配列構造を実現し、個々のナノドットが抵抗変化型のメモリとして動作することを実証した。寒川研究代表者は上記の生体超分子の導入に加え、独自の中性ビームによる低損傷エッチングを用いて超高密度量子ドットアレイ構造を形成し、GaAs 系高性能量子ドット LED と Si 系高効率量子ドット太陽電池といったフォトニックデバイスの開発を行った。GaAs 系量子ドット構造は従来の量子ドット構造に比べ、均一性が著しく高く、1 桁近く高密度であり、トップダウンのビームエッチングを用いて作製された素子では、初めて高輝度の LED 発光を可能とした。Si 系量子ドット太陽電池では、同種の素子としては世界最高の変換効率 12.6% を得たが、バルクの Si 系太陽電池の効率には至っていない。量子ドットの 3 次元化等さらなる工夫が必要な状況にある。

以上の微小ドットアレイ構造を用いたデバイスのいくつかはその発展形も含め、産業化を目指し、内外の企業との共同研究を開始している。

② フレキシブル基板上的エレクトロニクス・フォトニクス・エネルギーデバイス

畠、藤岡、西澤、染谷研究代表者は、従来の高価な Si 基板、GaAs 基板ではなく、プラスチックあるいはグラファイトシート、さらにはゲル状物質のようなフレキシブルかつ安価な材料で、さらには生体との共存が可能なソフトな基板材料上にエネルギー・エレクトロニクス・フォトニクス素子を搭載し、次世代のヒューマンインターフェース、あるいはロボットなどに応用可能なナノシステムの実現を目指している。

染谷研究代表者は自己組織化単分子膜をゲート構造に用いた有機トランジスタを開発し、

高い歩留りでの安定動作に成功している。その結果、プラスチックシート状に有機トランジスタの集積回路を実現することが可能となり、フレキシブル・エレクトロニクスのパイオニアとして新たな応用分野の開拓を行った。本研究は Nature Materials を始めとする多くの重要な論文誌での成果発表、招待講演、受賞により高く評価されている。本研究は 3 年を経過した時点で終結し、ERATO の「生体調和エレクトロニクス」プロジェクトや、多くの企業が参加する産学連携の「次世代プリンテッドエレクトロニクス技術研究組合」に引き継がれた。

藤岡研究代表者は、独自のパルススパッタ堆積法を用いて、グラファイトシート上に InGaN 系の LED を試作し、In の組成を変えることで、青、緑、赤のフルカラーの発光が可能なことを示した。従来、GaN の光学素子、電子素子は高額なサファイヤ基板、あるいは SiC 基板を用いて作製されているが、フレキシブルなグラファイト基板を用いることで、大面積化、低価格化、高放熱化が可能になり、高輝度 LED、高効率太陽電池、パワーデバイス用 GaN 系ヘテロ接合トランジスタなどへの応用に道を拓いた。研究後半では InN 薄膜トランジスタを低温プロセスで作製し、高移動度動作を実現し、有機 EL や液晶ディスプレイの大面積化、低コスト化、低消費電力化を実現する有望技術となる。これらのデバイスの可能性は JST の ACCEL で追究されることになった。

樋口研究代表者はビス（ターピリジン）と鉄などの金属イオンと有機モジュールとをナノスケールで数珠つなぎに結合した有機／金属ハイブリッドポリマーを開発し、このハイブリッドポリマーにおける酸化還元反応を利用してエレクトロクロミック素子の開発を行った。上記の金属イオンを選択することで、3 原色の発光、また消光が可能な事を実証した。この現象を利用し、プラスチックやガラス基板上に塗布プロセスで形成されるエレクトロクロミック型のフルカラー電子ペーパーの開発を目指した。本研究領域期間中にフルカラー電子ペーパーの完全な動作には至らなかったが、CREST 研究領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」で平成 27 年度に採択され、引き続き、開発が継続されることになった。

西澤研究代表者は、導電性高分子からなる電極のマイクロパターンを酸素、栄養分が通過可能なゲルシート上に転写する技術を実現、実際に筋細胞が電気刺激によって運動するアッセイシステムを開発した。これにより生体に違和感なく電子デバイスを埋め込むことが可能になると期待される。また畠研究代表者と協力し、ナノ材料（高密度に林立する単層 CNT）にバイオ材料（酵素）を均一、高密度に導入した複合体を作製し、糖の分解によって発電する世界最高出力のバイオ燃料電池を開発した。

畠研究代表者は高密度に単層 CNT が林立して基板上に成長する技術を開発し、これによりプラスチック基板上のエネルギーデバイス（スーパーキャパシタ、バイオ燃料電池）や、ねじれ・引き伸ばしセンサーへの応用を実現した。前者は各種の可動型センサーへの自律的な電力供給に、後者はロボットや人に張り付けることで、その運動状態を感知することに各々利用できる。

以上のようにプラスチックやグラファイトシートのようなソフトな基板上にエレクトロニクス素子、発光素子、ディスプレイ素子、およびエネルギー素子が、さらには生体と共存可能なゲル状物質上に電極配線が集積可能なことを示してきたが、これにより、フレキシブルなソフト材料基板上に所望の機能を持ったナノシステムの搭載が可能になると期待される。人との情報のやり取りを、その存在を意識することなく自然に行える IoT やセンサーなどのヒューマンインターフェース、さらには人と共生可能なソフトロボットなどへの応用が期待される。

③スピントロニクス of 新たな展開

齋藤研究代表者は固体中のスピン流と熱、動力、電気伝導との間の量子力学的変換を可能とする新たな技術体系を構築し、スピントロニクスと熱工学、機械工学との融合により生まれる新たな応用分野の開拓を目指した。スピンゼーベック効果による熱電変換効果の増大を目指した研究では、フォノン機構の発見を始めとする複数のメカニズムを解明し、出力電圧の増大を実現した。またこの逆効果に相当するスピン流による熱輸送現象の発見、液体金属微小液滴ジェット流の白金薄膜への入射により、力学的運動からスピン流が生成されることを実証した。この分野では世界を先導しており、世界に先駆けての新しい学理体系の構築を目指している。スピン流から生ずる、熱エネルギー、電気エネルギー、力学的エネルギーの量子力学的な変換は将来、情報、エネルギー分野に新たな革新をもたらす可能性がある。

(2) 健康・医療問題解決に向けたライフイノベーション

①脳神経細胞の計測

脳神経は自然がボトムアッププロセスで作上げた極めて複雑で、高度のナノ構造体システムである。脳神経は極めて高度の情報処理を、人類が作り上げたコンピュータシステムとは全く異なる仕組みで行っている。その情報伝達の仕組み解明を目的に脳神経活動を細胞レベルで計測する技術を開発する。同時にその計測・分析技術は脳神経活動の異常を察知することで医療診断システムとして活用することが可能となる。この挑戦的な課題に対し、トップダウンの半導体プロセスで作製されるセンシングデバイスの開発に挑んだ。

澤田研究代表者は神経伝達物質の動きを CCD の原理を利用して、高い SN で 2 次元画面上にイメージングするセンサーの開発を行う。神経細胞網では情報の伝達は生体中のイオンによって行われる。アセチルコリン、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} といった神経伝達物質をリアルタイムに非標識で、2 次元空間上に画像としてイメージングできるセンサーの開発を行った。半導体微細化技術を用いて 100 万画素（画素ピッチ 10 ミクロン）の集積化にも成功しており、脳の海馬スライスへの化学物質刺激で、上記神経伝達物質の放出、吸収が起きることをリアルタイムで観測している。本技術はイメージング応用に焦点を当てた当初の構想を超え

てインフルエンザや胃機能などの医療診断にも適用可能であり、経産省プロジェクトへの採択、多くの企業との共同研究に発展している。また CREST 研究領域「統合 1 細胞解析のための革新的技術基盤」で 2014 年度に採択され、さらなる技術の発展を図っている。

宇理須研究代表者は培養型のプレーナパッチクランプを開発することで、神経細胞ネットワークの機能解析を目指した。パッチクランプによる神経細胞のチャンネル電流計測に成功すると共に、長期培養可能な状態でクランプ上に細胞を固定する技術を開発、ラット大脳皮質の神経細胞の化学物質に対する応答や神経細胞ネットワークでの自然発火電流の計測に成功した。これらの成果をもとに、期中から神経難病（アルツハイマー病や ALS 病）の疾患モデルの構築と神経細胞のハイスループットスクリーニングへの適用を目的する研究に着手した。本 CREST では上記につながる結果を得るには至らなかったが、CREST の「統合 1 細胞解析のための革新的技術基盤」で 2014 年度に採択され、引き続き、上記目標に向けた研究を継続している。

②バイオ（単一細胞、単一分子等）計測

DNA、タンパク質、糖鎖、細胞などの生体物質を単一分子レベルで、あるいは単一細胞レベルで解析することで、複雑な生命現象を生体分子反応といった分子素過程から理解したり、個々の細胞活性の違いや抗ガン剤などの細胞による感受性の違いを検知することが可能になり、分子、細胞レベルからの診断、医療、創薬に結びつく期待される。単一分子、細胞といったナノ構造体をトップダウンプロセスで作製されたマイクロ流路やセンシングデバイスで計測しようとの試みが本研究領域でなされた。

宮原研究代表者は、ゲートを機能性分子で修飾した半導体トランジスタで、DNA、タンパク質、糖鎖、細胞などの検出を行う技術を開発した。DNA 検出技術は、世界初の半導体による電気検出 DNA シーケンサーとして米国企業により製品化された。タンパク質、糖鎖、細胞などについても半導体トランジスタによる検出に成功しており、ガン転移や細胞の活性などの非侵襲モニタリングとして医療部門との共同研究が進んでいる。一方で、同じ目的の競合技術も存在し、半導体トランジスタを用いた当該技術が、ラベルフリー、小型化、集積化といった特徴をどこまで活かしてその優位性を主張できるのか、さらなる開発が必要である。

北森代表研究者は拡張ナノ空間と呼ぶ径が 100nm クラスの微小なマイクロ流路を用いて、単一細胞中の分子の計測を試みており、現在までに従来のカラムクロマトグラフィに比べ 10～100 倍の分離能を実現し、短時間での極微量のタンパク質分析を可能とした。また本技術を微分干渉熱レンズ顕微鏡と組合せ、単一タンパク分子の非標識での検出を可能とし、ELISA 免疫分析デバイスとしての応用可能性を示した。これらの研究は CREST の「統合 1 細胞解析のための革新的技術基盤」で 2014 年度に採択され、さらなる発展に向け研究が引き続き推進されている。

野地代表研究者は、抗原抗体反応に起因する発光を利用して特定のタンパク質を検出す

る ELISA 手法に対し、上記タンパク質を多数の超微小空間に閉じ込めて発光検出を行う 1 分子デジタル計測法を開発した。これにより、検出感度を 100 万倍向上させる事に成功し、感染症や疾病マーカー分子の臨床検査に革新をもたらす技術として産業界の注目を集めた。既に複数の企業との共同研究に進んでおり、その一部は JST の先端計測分析技術・機器開発プログラムで高感度検査システム開発として引き継がれている。CMOS イメージセンサによるレンズレス蛍光検出にも成功しており、低価格・可搬型診断計測システム実現への期待は高い。本研究からの派生成果として脂質 2 重膜チャンバアレーの形成にも成功しており、人工細胞リアクタ構築を目標とする ImPACT 事業として 2015 年度に採択されている。

③細胞ハンドリング

マイクロ流路内に各種デバイス構造を導入し、流路中の細胞の新たなハンドリングを実現することで診断、医療、創薬への応用を目指した研究を行った。藤井研究代表者は、マイクロ流路中に人工バイオ界面を埋め込み、特定の細胞をトラップする仕組みを開発、さらに液性や液流といった細胞の外部環境を変化させることで、細胞の動態を制御可能なナノシステムを実現した。これまでに ES 細胞に対しては複数胚葉への分化の時空間的な制御に、血中循環腫瘍細胞に対しては人工ペプチドアダプターによる補足に、各々成功している。これらの技術は前者では創薬スクリーニングや再生医療、後者では各種ガン細胞の転移活性評価系や転移阻害スクリーニング系につながるものと期待される。本研究領域内の野地研究者との共同研究では、マイクロウェルアレイ技術とエレクトロポレーション法との組合せで単一細胞の新たな解析手法の開発に成功しており、今後の進展に期待したい。

西澤代表研究者は、電気化学的手法で、マイクロ流路内のタンパク質、細胞、導電性高分子を設計した場所に固定するバイオリソグラフィやバイオ誘電泳動法を開発、人工的な細胞組織の構築を可能とした。これらの結果をもとに、免疫アッセイ、細胞の分化検出、末梢血液診断などへの応用を念頭においたバイオ集積操作が半自動で行える試作機を開発、一部は商用化するに至っている。

(3)独自の手法によるナノ構造体の創出と新応用分野の開拓

有機材料を用いた独自の手法により新たなナノ構造体を創出し、ナノシステムとしての多様な応用可能性を追求する課題研究が実施された。

辻井研究代表者は、独自の分子組織体「濃厚ポリマーブラシ」の階層構造化を図ることで、エネルギーデバイス応用やバイオデバイス応用の実現を目指した。CREST 期間中、リビングラジカル重合法による多様なナノブラシ合成ルートを確立し、各種ブラシを構成要素とする階層化構造を実現した。潤滑性、生体親和性、表面修飾能力を有する濃厚ブラシの適用範囲は広い。蓄電デバイス応用では、ナノブラシの積層 3 次元構造からなる固体電解質を開発、Li イオン電池における優れた伝導チャンネル特性を実証し、高電圧化が可能なバイポーラ型電池の試作に成功した。この固体電解質膜は燃料電池やスーパーキャパシタ

など、他の電気化学デバイスにも応用可能である。バイオデバイス応用では濃厚ブラシの細胞接着抑制機能や細胞増殖足場機能が実証され、医療応用への展開が期待される。

山元研究代表者は樹枝状の有機分子 dendrimer の構成元素を順次、金属元素で置き換え、金属元素の原子数や配合比を精密かつ自在に制御したサブナノオーダーの金属、半導体、酸化物、多元素合金などの「新金属微粒子」の創製とその工学的応用を目指した。原子数の異なる白金サブナノ微粒子を合成し、原子数 1 個の違いで白金の酸素還元触媒活性が大きく変化すること、特に構造上活性点を多く持つ非魔法数の白金原子の粒子が高い触媒活性を持つ事、またロジウムと鉄の合金では特定の原子数配分で高い触媒能を示す事などが実証された。これらの結果は新たな学術領域を切り開くと同時に、大量合成が進めば産業的なインパクトも大きいと予想する。これらの成果は、2015 年度に採択された JST の ERATO プログラムで、引き続き研究が推進されている。

(4) 研究領域内共同研究

領域内の共同研究により、個々の研究課題に対して補完技術が導入され、その進展が期待できるだけでなく、ナノシステム創製という未知なる共通目標が、より具体的な姿にブレークダウンされることを期待している。このため、毎年、領域内の代表研究者全員に対し、共同研究テーマを募集し、選定されたテーマに対しては総括裁量経費を配賦して実施した。

代表的成果として、1) CNT バイオ電池の開発、2) エレクトロアクティブマイクロチェンバアレイを用いた細胞及び生体分子の解析、3) 濃厚ポリマーブラシによる 2 次元イオン画像チップの高性能化、4) 中性粒子ビーム窒化による低温 GaN 薄膜形成などを挙げることができる。1) は畠チームの開発した高密度に林立した CNT で酵素を巧妙に挟み込み、糖の分解を行うことで、バイオ燃料電池として世界最高出力密度を西澤チームが達成したものである。この素子では CNT と酵素の最密複合体構造により、フィルム 1mm^2 あたりに 3 兆個存在する酵素すべてが最大限の反応速度で働いている。2) では野地チームの開発した細胞や生体分子を高密度マイクロチャンバアレイにトラップする技術と藤井チームの細胞などを誘電泳動でチャンバ内にトラップする技術、エレクトロポレーションによってトラップされた細胞の内容物を取り出す技術とを組合せ、マイクロチャンバへの細胞単体や生体分子を高効率で捕獲し、さらにそれらの超精密分析を可能とした。3) では辻井チームの開発した濃厚ポリマーブラシを、澤田チームの開発した 2 次元イオンイメージングチップのセンサー部位に適用し、表面改質によりセンサーの不活性化、あるいはイオン選択的な高活性化を実現し、2 次元イオンイメージングチップの超小型化、あるいは高性能化を可能とした。4) ではこれまで超低損傷微細加工プロセスとして開発してきた中性粒子ビームが化学変換プロセスとしても利用可能であることを実証した。具体的にはガリウム塩化物に窒素の中性粒子ビームを照射、ガリウム窒化物が形成される事を確認した。これは高温・高圧を必要としていた反応がビーム励起表面反応により室温で進行可能なことを意味する。この結

果は NEDO プログラムで平成 27 年度テーマとして採択され、さらに研究が推進されている。その他の共同研究からも興味深い結果が得られている。

(5) 本研究領域に続く研究資金の獲得状況

本研究領域の研究成果をもとに、得られた継続の研究資を、ここにまとめておく。

- ・ 本研究領域での成果を進展させ、科学技術上の新分野開拓へ、新 CREST 研究領域に 4 テーマが採択
 - 「統合 1 細胞解析のための革新的技術基盤」研究領域
澤田、北森、宇理須
 - 「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」研究領域
樋口
- ・ 本研究領域での成果を進展させ、科学技術上の新分野開拓へ、ERATO に 3 テーマが採択
 - 「染谷生体調和エレクトロニクス」プロジェクト
 - 「斎藤スピン量子清流」プロジェクト
 - 「山元アトムハイブリッド」プロジェクト
染谷、斎藤、山元
- ・ 本研究領域での派生成果を基に科学技術上のイノベーション創出へ、ImPACT に採択
 - 「豊かで安全な社会と新しいバイオものづくりを実現する人工細胞リアクタ」
野地
- ・ 本研究領域での技術的成果を進展させ、新産業分野開拓へ、ACCEL に 2 テーマが採択
 - 「PSD 法によるフレキシブル窒化物半導体デバイスの開発」
藤岡
 - 「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」
辻井
- ・ 本研究領域での成果を基に企業と組んで医療診断装置の開発へ、JST 先端計測に採択
 - 「超早期診断に向けた超高感度デジタル ELISA 検査システムの開発」
野地
- ・ 本研究領域での派生成果を基に科学技術上の新分野開拓へ、NEDO プログラムに採択
 - 「中性粒子ビーム励起表面反応による新物質創製」
寒川

(6) 研究成果によってもたらされた国内外の顕彰・受賞等

日本学士院学術奨励賞 2 件、文部大臣科学技術賞 4 件、文部大臣若手科学者賞 2 件、日本 IBM 科学賞 2 件、中谷奨励賞 2 件、山崎貞一賞、井上学術賞、市村学術賞、その他 10 件

8. 総合所見

(1) 本領域の意義

研究領域が設定された当初（2008 年）の問題意識は、半導体微細化技術の限界を打ち破るプロセス融合への期待とそれによって実現されるデバイス機能にあった。融合プロセスとしては、生命体などに見られる自己組織的なナノ構造形成機能への期待であり、デバイスでは半導体の世界で言うところの“MORE THAN MOORE”、即ち多様な機能の集積への期待である。上記の問題意識から発せられる期待に応えるとの本研究領域の方針は、この間変わっていない。一方で、その後、環境・エネルギー・資源問題や高齢化社会における医療、健康の問題が顕在化し、グリーンイノベーションとライフイノベーションをもたらすナノテクノロジーへの期待が高まってきた。グリーンイノベーションでは、太陽電池、二次電池の開発に見られるように素材のイノベーションが強く求められている。また、ライフイノベーションでは、iPS 細胞研究の急速な進展にも見られるように細胞ハンドリング、分化制御、バイオ計測の進展をもたらすナノ材料技術が強く求められている。最近では、スマート（快適で安全な）社会実現へ向け、情報通信技術への期待が高まっている。情報通信技術はエレクトロニクスに支えられており、ナノエレクトロニクス、フォトニクス、スピントロニクス、さらにはセンサー群に代表されるユビキタス・インターフェースの進展への期待が高まっている。その意味では当初の問題意識は徐々に形を変えつつあるが、ナノ構造体の重要性は不変であり、そこで生まれる機能をベースに、時代が要請するニーズに応えうるナノシステムを構築していくことの重要性は同じである。

本研究領域は時代の変革期において適正に設定され、また運営されたものと考えられる。本研究領域では単にトップダウンとボトムアップの融合に留まらず、半導体、バイオ、材料科学、分子技術等の分野融合が戦略的に進められ、研究総括による強い政策的な誘導と先導が功を奏した研究領域となった。

実力があり伸び盛り期にある大学の研究者に大きな額の研究費を助成し、その使途やグループ内の配分のほかマネジメントを委ね、またその一方で領域内共同研究の提案奨励と査定を適正に実施するという、研究者の意欲と創造性を引き出す研究マネジメントによって、ナノ炭素材料の MEMS デバイス、バイオ電池、一分子デジタル計測、新原子ナノクラスターなど次世代につながるデバイスやプロトタイプへの提示がなされ、一般の方でも理解しやすい成果が得られた。また、研究代表者の多くが ImPACT、ERATO、ACCEL、新規 CREST 等の新たな代表者として研究の質を拡大し、単なる継承研究ではなく新たな展開研究の開拓につなげたこともその大きな証左と言えよう。

反省すべき課題があるとするれば、「独創的な研究」、「実用化」というベクトルの異なる二つの軸を同時に追い求めた結果、中途半端な成果に終わった課題が存在することである。研究課題によっては、中間評価時点でのより厳しい見極めのもとに、より方向性を位置づけることが必要であったかもしれない。

(2) 課題選考、領域運営に関するマネジメント

当初、産学連携の研究課題の提案を期待したが、産業界が主体になった応募は残念ながらなかった。募集を開始した2008年度は、丁度、リーマンショックが起きた年で産業界が基礎研究を行う余裕をなくしていたことが一つの原因と考える。この傾向はその後も続いており、基礎研究を担うアカデミアの役割は重くなっており、成果の社会への発信と産業界との連携がますます重要になっている。当研究領域では課題研究の進展に伴い、各研究代表者が産業界との共同研究を積極的に実施しており、その件数は年と共に増大している。これは、当研究領域で時代の要請に応える技術を生み出していることの一つの証であろうと認識する。一方で、ボトムアッププロセスとトップダウンプロセスの融合を追究し、同時に出口としてのナノシステムの創製を視野に研究を実施するには、それなりの研究資金や協力体制が必要であり、実施できる研究者は限られている。そのため、研究課題の選別にあたっては、プロセス融合はかなり広くとらえ、むしろ新しい学理の構築を目指しているか、出口としての工学的応用をしっかりと見据えているか、夢を実現するだけのしっかりとしたエビデンスデータを持っているかという点を採択の最大判断ポイントとした。

運営にあたっては、領域内共同研究の推進がうまく機能したと考える。バイオ燃料電池や単一の生体分子、細胞のデジタル計測に見られるような成功例も多く生まれている。また今回の報告書では記載していないが、今後が楽しみな共同研究の検討も始まっている。カバーする領域が広いため、異分野融合という視点で、技術面、知識面で補完関係を構築することのメリットは大きい。領域全体でナノシステムの具体的な姿を追求するとの意味で、共同研究の果たした役割は大きかった。

一方で専門的な議論の深化という点では分野を同じにする研究者が集まって議論することも重要と考えている。領域内の研究者を対象にバイオ関連ワークショップを開催したが、バイオ領域共通の問題意識を醸成し、それを仲間内で徹底的に議論し、結果を共有するという面では有意義であった。

研究課題の選考、あるいは領域の運営にあたっては、アドバイザーの協力、支援が大きくな力となった。特に化学、バイオ関連において専門家としての意見は大変参考になった。各研究代表者担当のアドバイザーを設けたことも、責任をもって対応していただく点で良かったと考えている。

(3) 研究成果と今後の展望

① スマートでエコロジカルな社会実現へデバイス・材料革新

(i) 自己組織化生体材料のエレクトロニクス・フォトニクスへの応用

半導体デバイスの量子ドット応用（不揮発半導体メモリ、薄膜トランジスタ、高密度量子ドットレーザ/太陽電池）として、独自性が高く、世界でもトップレベルの成果が得られていると認識する。この分野は、競合技術も多く、従来素子に対してどれだけ性能、機能

面で優位性を出せるか、世界的レベルでのベンチマークが必要になってくる。かつてはこのような技術を引き受ける国内半導体メーカーが多く存在したが、現在はその余裕を失っていると言わざるを得ない。エレクトロニクスは日本の情報通信産業を支える基盤として、また輸出産業として重要性は高い。グローバル化の時代、技術移転先として海外も含めて考え、このような次世代半導体の技術は継続的に発展させていく必要があると考える。

(ii) プラスチックなどのソフト基板材料上に形成されるエレクトロニクス・フォトニクス・エネルギー・バイオ素子

プラスチックあるいはグラファイトシート、さらにはゲル状物質のようなフレキシブルで安価、さらには生体との共存が可能なソフト基板上に、多様なエレクトロニクス、フォトニック、エネルギーデバイスが開発された。これらを集積化することで実現されるヒューマンインターフェース、ウェアラブル健康モニター、あるいはロボットなどに期待が高まる。ロボットも現在の産業用からやがて家庭に入ってきて、高齢者の見守りや介護といったサービス用への需要が高まると期待される。そこでは人間にとって違和感がなく、安全で安心なロボットが必要となり、ソフトな材料で構成され、ソフトな動きをするロボットが要求される。ソフト基板上のデバイス・材料への需要は今後高まると予想する。

幸い、本 CREST 課題の中で、市場が見えてきた技術から、CREST、ERATO、ACCEL と国からの研究継続資金が投入されている。CNT の応用開発を進めてきた畠研究代表者は企業からの大型資金導入により、CNT の量産商用化に進んでいる。他の研究課題も上記に続くと期待している。

②健康・医療問題解決にライフイノベーション

(i) 脳神経細胞の計測

センシングデバイスの開発は、集積化も含め着実に進んでいる。また共通課題であったデバイス上での脳神経ネットワークの長期培養系の構築も目処がつきつつある。センシングデバイスは微細化により、空間的、時間的解像度が確実に高まっており、これに伴って外部医療機関と連携した診断応用が進みつつある。一方で、本来の目的である脳神経ネットワークそのものへアプローチするバイオ研究者との連携は十分とは言えない。脳神経ネットワークの活動計測は容易な課題ではないが、脳神経難病の解明も含め、時代が要請する重要な研究領域である。幸い CREST で 2 テーマが採択され、この分野への挑戦が継続できる体制になっており、今後の発展に期待したい。

(ii) バイオ（単一細胞、単一分子等）計測

半導体技術をベースに単一分子、単一細胞レベルのバイオ計測を行う技術では、世界トップレベルの成果が生まれており、当 CREST は日本のこの分野の牽引者といっても過言でない。野地代表研究者により、バイオ計測・解析のデジタル化という概念が導入された意

義は大きく、半導体デバイス技術との整合性も高く、今後の産業的発展を期待したい。これらの成果は CREST3 テーマ、先端計測テーマ、ImPACT テーマとして採択されており、さらなる継続発展を期待したい。

(iii)細胞ハンドリング

iPS 細胞、ES 細胞といった幹細胞の研究の進展に伴い、再生医療応用への期待が高まっており、マイクロ流路を用いた細胞ハンドリング技術やナノ構造体を用いた足場材料の開発が重要になっている。マイクロ流路に設けられた人工バイオ界面に特定の細胞を捕捉し、細胞に対して擬似的な外部環境を作りだし、細胞の分化や動態変化を制御・観測するシステムの構築は興味深い。藤井代表研究者と野地代表研究者の共同研究の結果生まれた新規な単一細胞計測・解析技術も今後の発展が期待される。これはナノバイオ技術全般に対して共通だが、今後は医療研究者、バイオ研究者にとって意味のある情報や知見がこれらの技術からどれだけ生まれるのかが試金石となる。医療研究者、バイオ研究者とのいっそうの連携が必要な由縁である。

③独自の手法によるナノ構造体の創出と新応用分野の開拓

濃厚ナノブラシが当初の予想を超えて、多様な分野への展開が可能になっている。電池を代表とするエネルギーデバイス応用の他、細胞接着抑止機能や細胞増殖足場機能を利用したバイオデバイス応用、マイクロ流路、バイオ計測への適用、さらにはナノトライポロジーへの応用と多様な可能性が提示されている。どれが最終的に本物の技術になるかは予断を許さないが、独自の材料を持つことの重要性を再認識している。その意味では、山元代表研究者による樹枝状の有機分子 dendrimer 構成元素を置換して作製される新金属微粒子も同様であり、このユニークなナノ構造体が触媒応用だけでなく、どれだけ応用の可能性が広がるかが今後の展開の鍵を握る。幸い、これらのテーマは ACCEL、ERATO といった国のプログラムで継続支援がなされることになり、今後の発展に期待したい。